

Clase 10: Simulación de recintos mediante sistemas de convolución

Hemos estudiado que reproducir las condiciones acústicas de una toma en forma virtual y obteniendo buenos resultados requiere del análisis de muchos factores, los cuales deberán considerarse a la hora de intentar simular un recinto que en realidad no existe para lograr una buena sensación de espacialidad. En esta clase estudiaremos el comportamiento de las salas, para poder ajustar los parámetros de los procesadores de reverberación a criterio, y en particular a aquellos que procesan a las señales de entrada con diferentes *respuestas al impulso*.

El sonido en los recintos

En el espacio abierto, el sonido emitido por una fuente se propagará alejándose de la fuente y su intensidad decaerá cuadráticamente, donde el nivel sonoro se reducirá en 6dB cada vez que se duplique la distancia. Dentro de un recinto, las perturbaciones en el aire se propagarán hasta chocar con un obstáculo (paredes, superficies, etc., Figura 1), y debido a que cambiará la impedancia característica del medio, parte del sonido se reflejará, mientras que otra parte será absorbida (disipada en forma de calor) por el material, y otra parte se transmitirá a través de este (Figura 2).

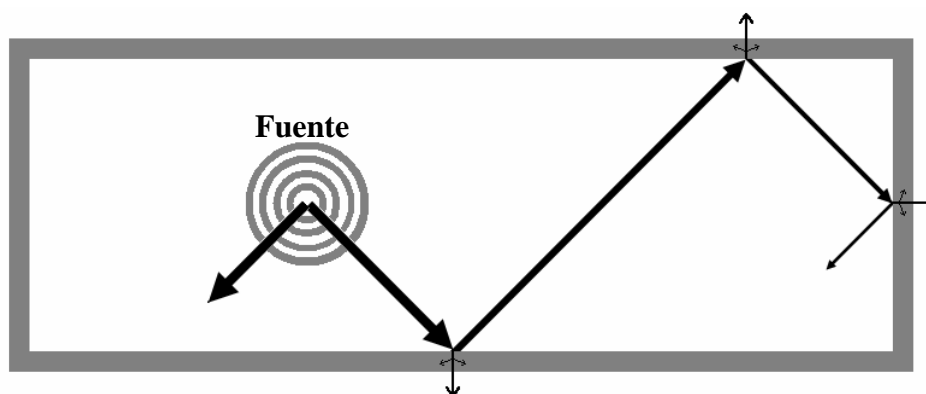


Fig.1 - Propagación del sonido en un recinto

Cada material en particular posee diferentes coeficientes tanto de absorción como de transmisión, para cada frecuencia en particular. Asimismo, el espesor y las dimensiones de cada material influirán en estos valores. Para el estudio del campo acústico interno sólo nos interiorizaremos en las características de absorción de los materiales, pero también en la geometría de la sala y los diferentes obstáculos presentes.

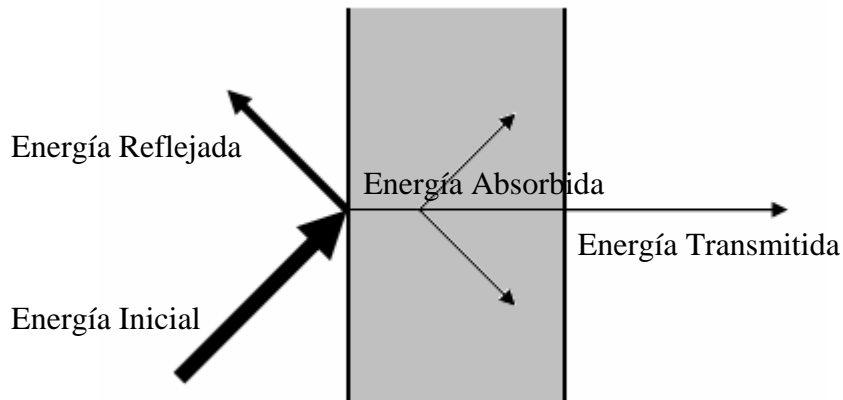


Fig. 2 – Comportamiento del sonido frente a un obstáculo

Campo Acústico Interno

Cuando percibimos dentro de una sala el sonido de una fuente, una parte pertenece al sonido directo de la propia fuente, pero otra parte corresponde al sonido reflejado por las superficies internas del recinto (Figura 3). A medida que nos alejamos de la fuente, como la reverberación puede considerarse prácticamente homogénea para toda la sala, y su intensidad de igual forma para casi cualquier sector, la proporción entre el campo reverberante respecto al sonido directo aumentará. Pero esta es sólo una de las cuestiones a considerar en la sala: la geometría jugará otro papel importante. Dejando de lado la influencia de las concavidades (las cuales producen focalizaciones acústicas), el comportamiento modal será de vital importancia debido a las ondas estacionarias que se producirán.

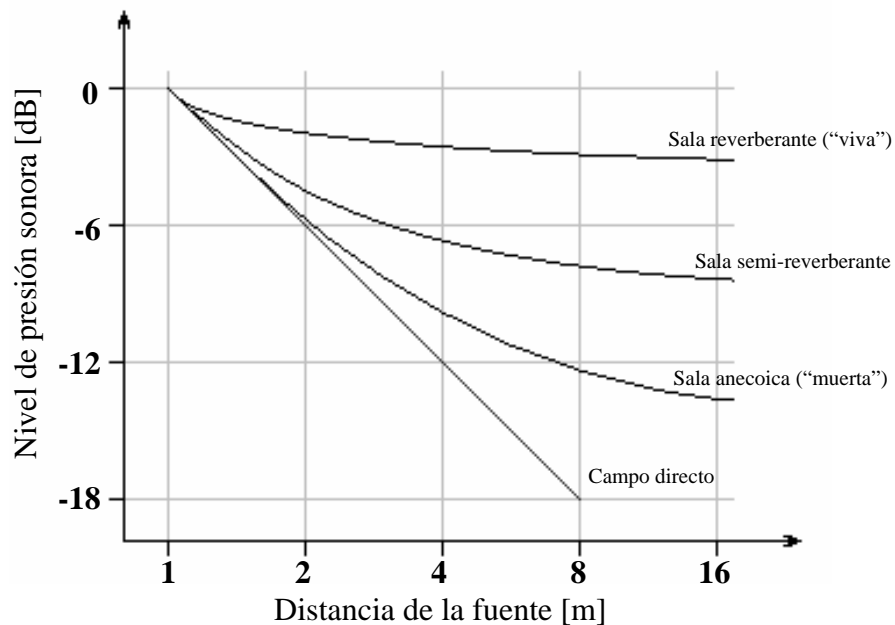


Fig. 3 – Niveles de presión sonora del campo directo y campo reverberante

Modos naturales

Cualquier recinto puede considerarse como un resonador complejo, debido a que entre superficies pueden generarse un gran número de resonancias, conocidas como *modos*. Los modos de una sala pueden ser tanto axiales como tangenciales u oblicuos, y estarán asociados a una frecuencia particular (o a un determinado ancho de banda). Los modos no necesariamente se dan entre superficies paralelas. Sin embargo, si las dimensiones pueden acercarse a las de un prisma, podemos calcular la frecuencia de resonancia f mediante la fórmula

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \text{ donde } c \text{ corresponde a la velocidad del sonido,}$$

las l a las dimensiones de la sala y los índices n al orden del modo, los cuales pueden ser cualquier número entero.

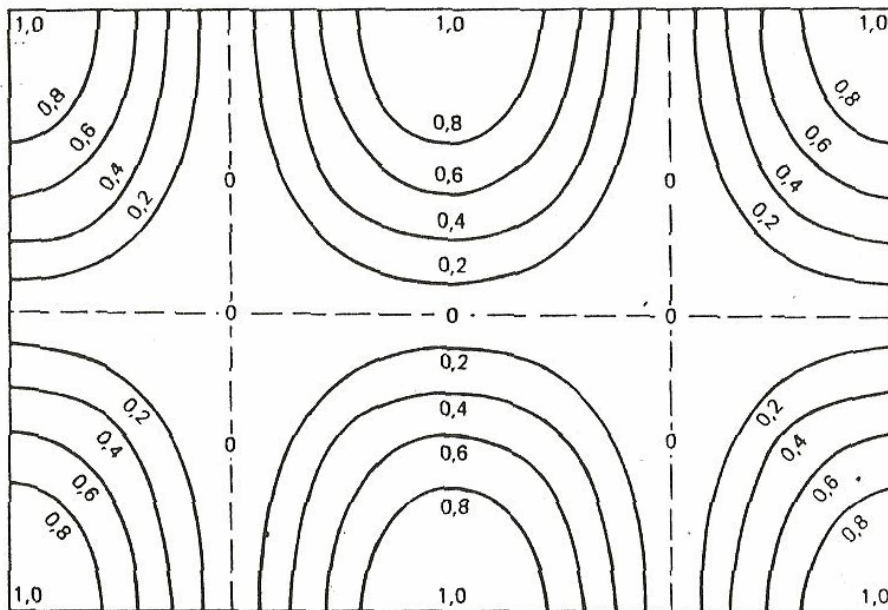


Fig. 4 – Modo tangencial (2,1,0) – Fuente: Méndez, A. M. Acústica Arquitectónica

Estas ondas estacionarias suelen permanecer por un tiempo en la sala, e incluso a veces, si bien no son audibles, son captadas por los micrófonos. Como su presión es máxima en las esquinas o en ciertos puntos al ras de las paredes, hay ciertos instrumentos o fuentes acústicas que habrá que acercarlos o alejarlos de estos sectores, según nuestra conveniencia. Es por ello que la “coloración” de la sala en baja frecuencia podrá favorecernos o complicarnos, dependiendo de las fuentes que se encuentren en su interior.

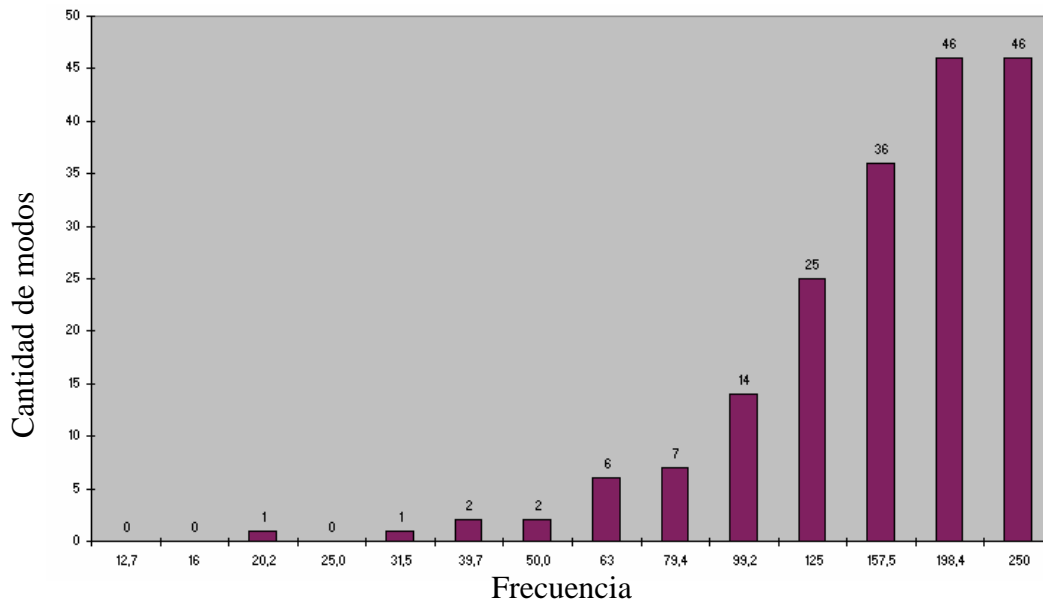


Fig. 5 – Densidad modal por tercios de octava para una sala de 8mx5mx3.2m

Para frecuencias superiores a los 250-300Hz, la densidad modal crece enormemente, y no tiene sentido su cálculo ya que el comportamiento de las reflexiones empieza a convertirse en campo reverberante.

Reverberación

Una vez que el sonido emitido por la fuente se detiene, la energía almacenada en la sala en forma de ondas estacionarias persiste, y disminuye gradualmente, dando lugar al fenómeno de reverberación. Esta disminución de la energía acústica acumulada en la sala nos es igual para todas las frecuencias, y depende tanto del volumen de la sala como del revestimiento de las superficies. El tiempo de reverberación TR es el tiempo que demora el nivel de presión sonora en decaer 60dB. Una fórmula empírica que no ha perdido uso con el correr de los años es la del cálculo de TR de Sabine, donde $TR = 0.16 \frac{V}{A}$ [s], considerando

V al volumen interior de la sala en m^3 y $A = \sum \alpha_i \cdot S_i$, que corresponde a la suma de todas las superficies (paredes, piso, techo, obstáculos) multiplicadas por sus coeficientes de absorción correspondientes. Deberá calcularse TR para cada banda de frecuencia para obtener una buena aproximación a la realidad.

En la actualidad contamos con mejores herramientas de cálculo, algunas tales como programas de diseño y simulación de recintos (CATT Acoustic, Odeon, entre otros), como muestra la Figura 6. Sin embargo, también podemos mejorar la ecuación de Sabine dependiendo de las condiciones acústicas del recinto, modificando el coeficiente A como lo muestra la Tabla 1.

Nombre	Coefficiente A	Aplicaciones
Ecuación de Sabine	$\sum S_i \cdot \alpha_i$	Recintos vivos con valores de $\alpha < 0.2$
Ecuación de Eyring	$-S_T \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})$	Distribución uniforme de absorción con $\alpha > 0.2$
Ecuación de Millington -Sette	$\sum -S_T \cdot \ln(1 - \alpha)$	Distribución no uniforme de absorción, pero al menos con un valor de $\alpha > 0.2$
	$-\bar{\alpha} \cdot S_T + 4mV$ ($m = \text{cte abs. aire}$)	Grandes recintos, donde la absorción del aire no es despreciable

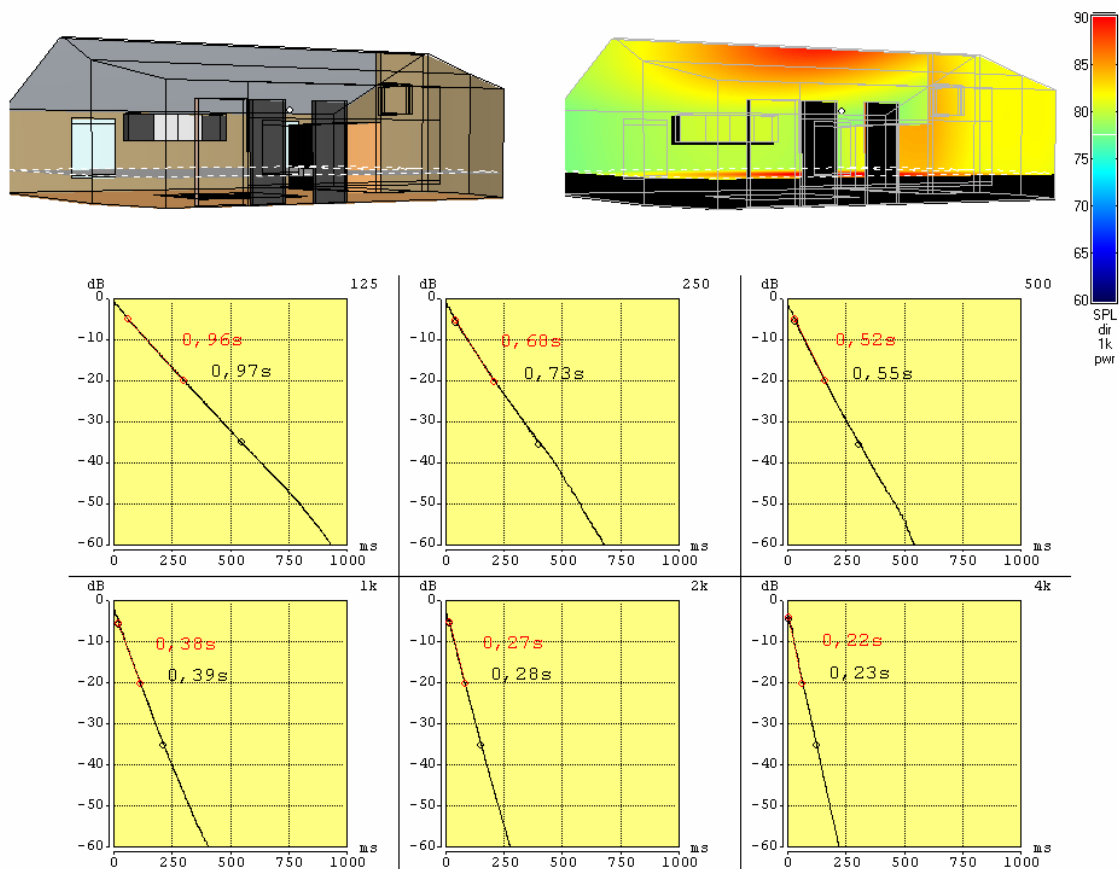


Fig. 6 – Simulación por software Catt Acoustic

Para frecuencias inferiores a 1kHz la absorción del aire es despreciable. Sin embargo, es un factor que no debe dejarse de lado, especialmente en recintos grandes. Está condicionado por la temperatura y la humedad ambiente.

Características de la reverberación

Como vimos anteriormente, podemos dividir al sonido del recinto en tres partes: el sonido directo, las primeras reflexiones, y el campo reverberante propiamente dicho (Figura 7). Estas primeras reflexiones son percibidas por el

oído como un “paquete”, que se integra al sonido directo, y el cerebro la interpreta como una determinada cualidad acústica. Además de aportar a la precedencia y sensación de espacialidad, también aportan al “color” del instrumento y a su “cuerpo”, por lo que serán muy importantes tanto para el ejecutante como para los músicos con quien comparta escenario. Esto es debido a que la ventana de percepción oscila los 35ms, y es por ello que son tan importantes en el Efecto Haas. Pero si el ITDG (Initial Time Delay Gap, tiempo entre el sonido directo y la reflexión temprana con más energía, que no necesariamente es la primera) es muy largo, las reflexiones tempranas no aportarán al cuerpo de la señal y se percibirán como ecos.

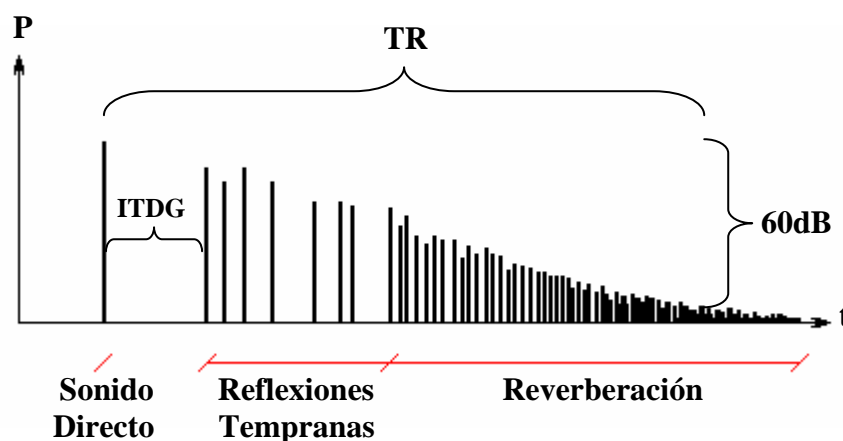


Fig. 7 - Características de la reverberación en un recinto

Otras sensaciones de eco están condicionadas por las geometrías y materiales de la sala. Si el paralelismo es muy marcado, es altamente probable que ocurra un fenómeno llamado “eco flotante” (*flutter echo*), donde las reflexiones van y vienen entre las paredes, y se perciben como 4 o 5 rebotes y/o repeticiones de la misma onda. Caídas de la cola de reverberación con formas de serrucho tienden a delatar este fenómeno.

Distancia Crítica

El situarse en distintos puntos de una sala donde la fuente acústica se encuentra siempre en el mismo lugar nos permitirá poder percibir distintas relaciones entre el sonido directo y el campo reverberante. Como este último puede considerarse constante para todo el recinto, a medida que me aleje de la fuente, el nivel sonoro disminuirá, pero hasta cierto punto donde el campo reverberante empiece a preponderar. La distancia exacta donde el oyente percibe el mismo nivel de presión sonora de sonido directo que de campo reverberante se conoce como distancia crítica (Figura 8). Para lograr una buena toma de instrumento y sala es muy importante conocer dicho punto.

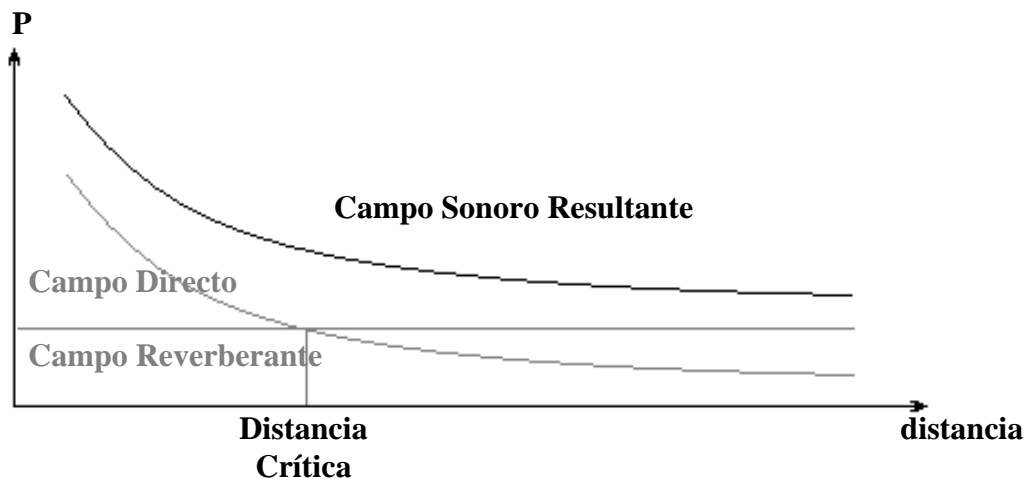


Fig. 8 - Distancia Crítica

Para calcular la distancia crítica en forma sencilla basta con despejar la distancia d de la ecuación $p^2 = \rho_0 c \left(\frac{1}{4\pi d^2} + 4 \frac{1-\alpha}{\alpha S} \right) W$, donde W es la potencia acústica, ρ_0 es la densidad del aire (1.2kg/m^3), α es el coeficiente de absorción y S es la superficie interna de la sala.

Respuesta al impulso de una sala

Todas estas características de la sala pueden saltar a la vista con un simple impulso, donde podremos distinguir fácilmente cuánto tiempo tarda en extinguirse ese impulso, si hay eco flotante, etc. Esto es debido a que la sala se comporta una función de transferencia, que modifica al sonido de las fuentes, y estas funciones se pueden calcular.

El comportamiento de la sala con respecto a la fuente es similar a un proceso de *convolución*. Una convolución es un operador matemático que transforma a dos funciones en una tercera, la cual representa a la magnitud en la que se superponen la primera y una versión trasladada e invertida de la segunda. Para dos funciones f y g , su producto de convolución responde a la integral $(f * g)(t) = \int f(\tau)g(t - \tau)d\tau$.

Al hablar de impulsos, generalmente nos referimos a sucesos de muy corta duración, que en el caso de las señales sabemos que poseen una gran composición espectral. Un impulso ideal será aquel que posea un $\Delta t=0$, que además nos proporcionará un ancho de banda infinito. En la realidad sabemos que eso no es posible, pero en el campo de la matemática sí lo es. La *delta de Dirac* ($\delta(t)$) es una distribución cuyo valor es infinito en un determinado punto, y cero para los restantes puntos. Esto implica que su ancho de banda será infinito, y que su integral entre menos infinito y más infinito será 1.

Dadas las propiedades de la convolución, al hacer el producto de convolución entre una función cualquiera y la delta de Dirac, el resultado será la función inicial ($f(t) * \delta(t) = f(t)$). A esta función $f(t)$ se la conoce también como *respuesta al impulso*, y en nuestro caso será igual a la función de transferencia de la sala a evaluar. La respuesta al impulso nos brindará toda la información necesaria en tiempo y frecuencia para conocer las modificaciones a la señal inicial que genere el recinto.

Reverberadores de Convolución

Una vez obtenida la respuesta al impulso de una sala, se podrá realizar la convolución entre esta respuesta al impulso y una señal cualquiera, lo que dará como resultado una señal de iguales características que si estuviese dentro de esa misma sala. Es por ello que los efectos de reverb de convolución son más reales que los de algoritmos, ya que contienen verdaderas “improntas acústicas” del espacio a simular. Estos efectos, además de “sonar más reales”, dependiendo del tipo de impulsos puede que no solo ocupen más espacio en memoria de disco, sino que también consuman más recursos de procesamiento.

Entre las más usuales reverbs de convolución se encuentran la Audioease Altiberb, cuyos impulsos son muy precisos y la sensación de profundidad y espacialidad es muy real; la W2, que además de ser muy fácil de ajustar posee ensanchadores de la base estéreo tanto de entrada como de salida; la SIR2, que posee un dispositivo reverberador cuatro canales en simultaneo para ofrecer una verdadera imagen estéreo; la Waves IR1, provista con una gran librería de impulsos muy reales y fáciles de parametrizar.



Fig. 9 - W2 de WIZOO

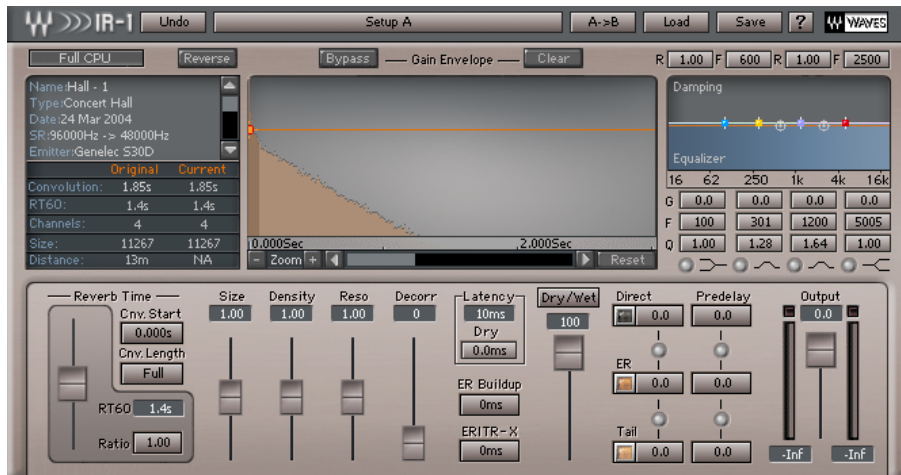


Fig. 10 – Waves IR1



Fig. 11 – SIR2

Bibliografía

- Alton Everest, F. *The Master Handbook of Acoustics*, McGraw-Hill, 2001.
- Mendez, Antonio M. *Acústica Arquitectónica*, UMSA, 1994.
- Miyara, Federico. *Acústica y Sistemas de Sonido*, UNR Editora, 2006.
- Tischmeyer, Friedemann. *Internal Mixing*, Tischmeyer Publishing, 2008.
- Wikipedia, *Free Enciclopedia*, 2009.